

**“支撑新一轮找矿突破战略行动专题”编者按:**本刊编辑部于2024年8月组织召开了“第六届探矿工程学术论坛”,论坛主题为“攻关先进适用钻探技术 支撑新一轮找矿突破战略行动”,共有80余篇论文在会议上进行了交流,这些论文总结了钻探工作者在新一轮找矿突破战略行动中取得的科技创新成果。本专题从中遴选13篇优秀论文发表,既有钻探理论、方法、技术、装备的创新成果,也有典型钻探工程的应用实践。该专题的出版,将有力推动钻探技术对新一轮找矿突破战略行动的支撑作用。

## 自行走钻具给进系统中支撑机构的仿生增效研究

高科<sup>1,2,3,4,5</sup>, 刘正豪<sup>1,4</sup>, 秦小琳<sup>1,4</sup>, 闻育民<sup>1,4</sup>, 张宗正<sup>1,4</sup>, 李旭<sup>1,4</sup>, 赵研<sup>1,2,3,4,5\*</sup>

- (1. 吉林大学建设工程学院, 吉林长春 130026; 2. 自然资源部定向钻井工程技术创新中心, 河北廊坊 065000;  
3. 中国地质学会定向钻井工程技术创新基地, 河北廊坊 065000;  
4. 吉林大学自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林长春 130026;  
5. 吉林大学地热资源开发技术与装备教育部工程研究中心, 吉林长春 130026)

**摘要:**随着地下浅层资源的逐渐枯竭,人们逐渐向地下更深部位寻求能源。为应对钻井过程中地下岩层的恶劣环境,提出自平衡钻进系统和仿生自行走钻具给进系统,将压力驱动装置移至地下。本文为解决自行走钻具给进系统中支撑机构的增效问题,通过分析螭螂头部表面非光滑结构对自行走钻具给进系统增阻机构表面进行仿生设计,并对其增阻性能以及对井壁的损伤进行了模拟仿真分析,同时对其摩擦磨损性能进行了实验测试,研究了不同仿生结构的增阻及减小磨损的效果。结果表明:螭螂头部凸包间距与直径的比值在1.50左右,中间部位凸包的直径与对应螭螂头部长度的比值在1:142~1:133,且在1:138附近出现的概率较大,两边凸包的直径与对应螭螂头部长度的比值在1:173~1:158之间,且在1:167附近出现的概率较大,中间部位凸包所占比例在45%左右,两侧所占比例基本相同;仿生结构设计的间距与直径比值在1.50附近时,有良好的增阻效果;相同凸包直径条件下,间距越大,对井壁的损伤越大;正三角形排布为仿生单元增阻效果最佳的排布方式,矩形排布会增大对井壁的损伤,同时降低增阻效果;同心圆形排布对井壁的损伤最大,增阻效果最差。

**关键词:**仿生增阻;自行走钻具;增阻机构;自平衡钻进系统;给进系统

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)05-0024-12

收稿日期:2024-07-31; 修回日期:2024-08-15 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.05.003

**基金项目:**国家自然科学基金项目“双钻头自平衡钻探岩石破碎过程与机理研究”(编号:42172345);国家重点研发计划“大直径扩孔钻进机理和抗冲击高效仿生异型钻头研究”(编号:2022YFC3005903-2);吉林大学研究生创新基金资助项目“Welleader旋转导向系统偏置机构仿生提效研究”(编号:2024CX103);自然资源部定向钻井工程技术创新中心、中国地质学会定向钻井工程创新基地开放课题(编号:KF202307、KF202304);吉林大学地热资源开发技术与装备教育部工程研究中心开放课题(编号:23021、23022);吉林大学自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室开放课题(编号:FZJS230101)

**第一作者:**高科,男,汉族,1977年生,吉林大学建设工程学院石油工程系主任,教授,地质工程专业,博士,主要研究领域为仿生钻探机具、科学钻探装备、地热钻探等,吉林省长春市西民主大街938号,gaokenm@jlu.edu.cn。

**通信作者:**赵研,男,汉族,1983年生,吉林大学建设工程学院勘查工程系副主任,教授,地质工程专业,博士,主要研究领域为地下蓄能技术、浅层地热能利用、井下多相介质耦合传热传质、大陆超深科学钻探技术与装备、仿生自平衡钻进技术,吉林省长春市西民主大街938号,zhaoyan1983@jlu.edu.cn。

**引用格式:**高科,刘正豪,秦小琳,等.自行走钻具给进系统中支撑机构的仿生增效研究[J].钻探工程,2024,51(5):24-35.

GAO Ke, LIU Zhenghao, QIN Xiaolin, et al. Study of bionic augmentation based on support mechanism in self-propelled feeding system[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(5):24-35.

## Study of bionic augmentation based on support mechanism in self-propelled feeding system

GAO Ke<sup>1,2,3,4,5</sup>, LIU Zhenghao<sup>1,4</sup>, QIN Xiaolin<sup>1,4</sup>, WEN Yumin<sup>1,4</sup>,  
ZHANG Zongzheng<sup>1,4</sup>, LI Xu<sup>1,4</sup>, ZHAO Yan<sup>1,2,3,4,5\*</sup>

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;

2. Technology Innovation Center for Directional Drilling Engineering, MNR, Langfang Hebei 065000, China;

3. Innovation Base for Directional Drilling Engineering, Geological Society of China, Langfang Hebei 065000, China;

4. Key Laboratory of Drilling and Exploitation Technology in Complex Conditions, MNR, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;

5. Engineering Research Center of Geothermal Resources Development Technology and Equipment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

**Abstract:** With the gradual depletion of shallow underground resources, people gradually seek energy from deeper parts of the earth. In order to coping with the harsh environment of underground formations during drilling, a self-balancing drilling system and a bionic self-propelled drilling tool feeding system are proposed to move the pressure drive unit underground. In this paper, in order to solving the problems of how to increase the efficiency of the support mechanism in the self-propelled feed system, the surface of the drag-enhancing mechanism of the self-propelled feed system is designed bionically by analysing the non-smooth structure of the head surface of the dung beetle. The drag-enhancing performance and the damage to the well wall are simulated, and the friction and wear performance is tested experimentally to study the drag-enhancing and wear-reducing effects of different bionic structures. The results show that the ratio of the spacing of the dung beetle head bumps to the diameter of the dung beetle head is around 1.50, the ratio of the diameter of the middle bumps to the length of the corresponding dung beetle head ranges from 1:142 to 1:133, with a higher probability near 1:138, the ratio of the diameter of the two side bumps to the length of the corresponding dung beetle head ranges from 1:173 to 1:158, with a higher probability near 1:167. The proportion of the bumps in the middle part was about 45%, and on both sides was basically the same; the spacing of the bionic structure design had a good drag-enhancing effect when the ratio of the spacing to the diameter of the bionic structure was around 1.50. Under the condition of the same diameter of the convex packs, the larger the spacing was, the greater the damage to the wall of the wells. The orthogonal triangular layout was the best layout for the drag-enhancing effect of bionic units, and a rectangular layout increased the damage to the wall of the wells, at the same time, reduced the drag-enhancing effect; Concentric circular arrangement has the greatest damage to the well wall and the worst drag-enhancing effect.

**Key words:** bionic drag augmentation; self-propelled drill; drag augmentation mechanism; self-balancing drilling system; feed system

### 0 引言

仿生技术作为科技创新发展的不竭源泉,为人类各个领域提供创新依据,也早已引入钻探领域。黎明和等<sup>[1]</sup>、He等<sup>[2]</sup>对昆虫的湿脚垫工作机制进行了分析,制备了具有微观结构的湿粘附材料并用于湿粘附机器人。隋秀华<sup>[3]</sup>采用仿生学原理,对煤矿生产使用的带式输送机传动滚筒进行了仿生非光滑设计,建立了凸包形非光滑传动滚筒仿生增摩理论体系。高科等<sup>[4]</sup>以鼯鼠爪趾为原型,设计高耐磨性切削齿。张毅等<sup>[5]</sup>从土壤动物适应生存环境而进化出在潮湿土壤中不粘土的特性出发,提出了仿生钻头的想法。王建强等<sup>[6]</sup>模拟分析了凸包型非光滑

表面对金刚石钻头性能的影响,发现仿生耦合钻头较普通钻头钻进时效提高很多。

随着地下浅层资源的逐渐枯竭,人们逐渐向地下更深部位寻求能源。然而,深部地层复杂,钻进难度指数上升,钻探作为地下能源提取的关键技术,急需攻关克难。深部钻探面临高温、高压和高地应力的严苛环境,不仅提高了岩石的强度,降低了其可钻性,同时也对钻探设备的功率和可靠性提出了更高的标准。在这种情况下,如果一味地增加钻压和扭矩,将会大大提高钻杆折断、井壁坍塌等钻井事故发生的概率。同时,由于地面钻机为钻进提供的钻压和扭矩需要通过冗长的钻杆,使得大量

能量在传递过程中耗散<sup>[7-11]</sup>。因此,深部钻探技术需要持续的创新和改进,以提高钻井效率,确保作业的安全性和可靠性。

高科等<sup>[12]</sup>、张聪等<sup>[13]</sup>为解决上述难题,提出自平衡钻进系统,以大功率电机为动力,近钻头驱动钻头碎岩;提出仿生自行走给进系统,将压力驱动装置移至地下。两套系统通过原理创新,突破了地面钻机通过钻杆将钻压、扭矩传递给钻头的传统模式,从而使钻进过程中的有效能量占比大大增加。

本文利用仿生学原理,对自行走给进系统中支撑机构进行增效研究,不仅为该系统实现井下连续增阻加压钻进提供了保障,同时也为其他领域提供启示,促进了钻探技术与其他领域的交叉创新。

## 1 支撑机构工作原理

仿生自行走钻具系统是以蚯蚓为生物原型所构建的近钻头动力驱动碎岩钻进系统,目前已开发出原理样机,如图1。

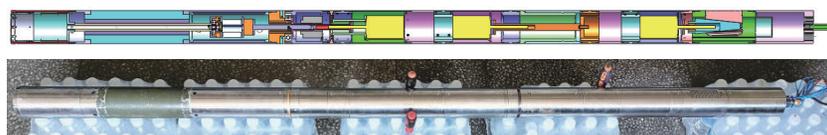


图1 自行走钻具系统三维模型和原理样机

Fig.1 3D model and principle prototype of the self-propelled drilling system

自行走钻具系统主要由支撑机构、行走机构、压力调节机构和内外钻头回转机构组成,如图2。支撑机构在工作时,推靠直线电机提供的垂直作用力通过推靠斜面变为横向推力施加在增阻块上,从而使增阻块与井壁产生足够的摩擦力。在钻进过程中,为达到高效钻进,就需要足够的钻头钻压来实现。自行走钻具系统钻压除自重之外,直接来源于行走机构所给的推力,而推力的上限取决于支撑机构所提供的反力。故此,支撑机构的增效问题,即在提高增阻快摩擦力的同时,减少对井壁的伤害,是整套系统能否实现高效钻进的核心问题。

## 2 螭螂头部增阻非光滑测定与分析

为得出高效的增阻块表面结构,本文引入仿生理念为创新依据,通过分析研究螭螂头部与土壤的增阻机理,优选仿生结构原型。螭螂体表不同部位分布着亚宏观至微观尺度上的多种非光滑形态,如凸包、凹坑、波纹和微观鳞片形等,这些微观非光滑结构使螭螂体表与土壤相互作用可产生微振效应、水膜不连续效应和界面空气膜效应<sup>[14-18]</sup>,使螭螂表面具有减粘、降阻、耐磨的特性,因此具有很高的效率。

为分析螭螂体表的微观凸包、凹坑结构,本文采用体视显微镜辅助观察。从整体角度观察雄性螭螂的头部凸包的分布情况,发现中间部位凸包间距较大,而两边较小;凸包直径也有中间大、两边小的规律,且两边的凸包直径较为均一,上下部位的

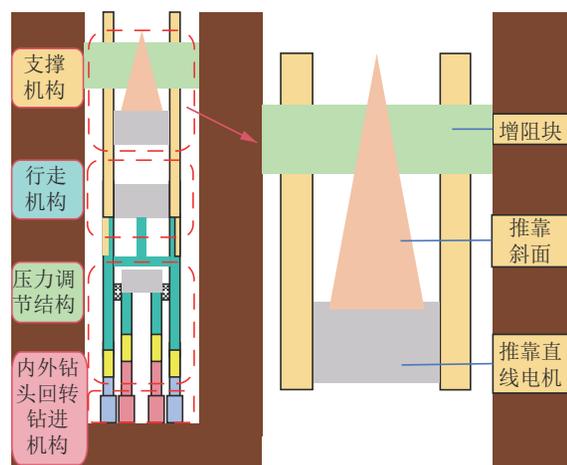


图2 自行走钻具系统结构及支撑机构工作原理示意

Fig.2 Schematic diagram of self-propelled drilling tool system structure and working principle of support mechanism

凸包则没有明显差异。根据观察到的凸包疏密程度,将螭螂头部分为3个区域,并测出每个区域的尺寸,如图3所示。

将上述划分的区域放大观察,并以0.5 mm为半径画圆,分别统计记录圆内凸包的间距、直径和凸包个数,每只螭螂头部有6个圆形。在统计凸包数据时,以凸包中心为算,在圆内时记一个,在圆外则不计,刚好压线则计为半个,每个圆内统计5~6组代表性凸包间距与直径数据。图4为第5只螭螂的凸包的间距、直径及其比值,可以看到螭螂的凸包

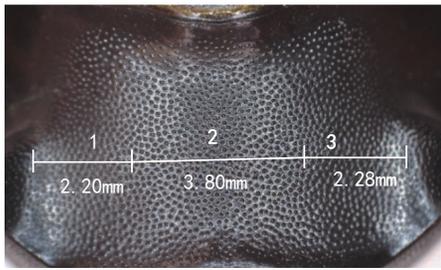


图 3 雄性蜣螂头部各部分的尺寸示意  
Fig.3 Dimensions of each part of a male dung beetle's head

与直径的比值在 1.50 左右。

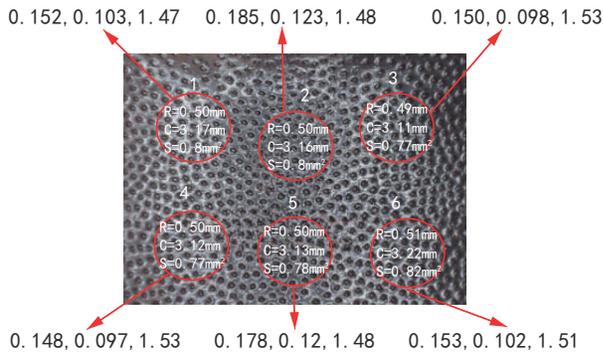


图 4 第 5 只蜣螂的凸包的间距、直径及其比值  
Fig.4 Spacing, diameter and their ratios of the 5th dung beetle's bumps

本次实验共观察统计并记录了 5 只雄性蜣螂的头部触土部位的尺寸  $Z$ 、凸包间的中心间距  $X$ 、凸包的直径  $D$  以及圆内凸包的个数  $L$  值, 并求  $X$ 、 $D$  平均值  $X^*$ 、 $D^*$ ; 将凸包简化为圆形结构, 并根据  $D^*$  与  $L$  计算凸包面积与圆形面积的比值  $P$  以及凸包直径与蜣螂头部尺寸比值  $H$ , 得出: 蜣螂头部不同部位的凸包大小有差异, 不同蜣螂同一部位的凸包尺寸也不相同, 但其间距与直径的比例在 1.50 左右; 并且中间部位的凸包尺寸稍大, 两边凸包尺寸较小; 中间部位凸包的直径与对应蜣螂头部触土部位长度的比值在 1:142~1:133, 且比值在 1:138 附近出现的概率较大, 两边凸包的直径与对应蜣螂头部长度的比值在 1:173~1:158 之间, 且在 1:167 附近出现的概率较大。

此外, 测量了图 3 所展示的不同区域长度, 计算其占总长度的比例, 发现蜣螂头部两侧凸包所占比例基本相同, 差别较小, 约 27.5%; 中间部位凸包所占比例较大, 约 45%。

### 3 自行走给进系统支撑机构仿生增阻设计与数值模拟

#### 3.1 数值模拟模型构建

##### 3.1.1 几何模型选定

实际增阻钻进过程中, 增阻块与井壁圆筒形表面紧密接触, 为后续完成增阻加压动作提供反力支撑。考虑到增阻块与井壁是面面接触的作用方式, 为简化模型, 缩短后期模型计算的周期, 将增阻块与井壁模型之间的曲面接触简化为平面接触。

本文采用 ABAQUS 软件, 研究和分析不同仿生增阻结构在增阻效果上的差异性。依次建立有不同仿生凸包表面形态的增阻块与井壁的相互接触几何模型。经过反复模拟试算, 最终确定了模型中增阻块与岩石的网格尺寸。增阻块与岩石均采用结构化网格划分技术, 共 201091 个网格单元, 其中岩石划分为 180000 个网格单元, 单元类型均为 C3D8R, 最终建立如图 5 所示的增阻块与井壁的连接作用网格模型。



图 5 增阻块与井壁的连接作用网格模型  
Fig.5 Mesh model of the contact interaction between the incremental blocks and the well wall

##### 3.1.2 材料参数与边界条件设置

在本模型中, 由于主要研究设置不同仿生凸包表面形态的增阻块在与岩石接触时所表现出的摩擦效果以及岩石的应力应变情况, 因此, 将增阻块设置为刚体。同时, 为岩石模型赋予相应的材料属性。具体参数设置如表 1 所示。

模型边界条件设置见图 6, 在分析过程中, 固定

表 1 井壁岩石材料参数

Table 1 Rock material parameters of the well wall					
模型	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/GPa	泊松比	抗压强 度/MPa	内摩擦 角/( $^{\circ}$ )
岩石	2840	31	0.17	105.951	43.62

约束岩石模型底面和侧面节点的位移和旋转自由度,同时保留模型中其余节点的自由度。在增阻块上施加沿 $z$ 轴负方向、大小为4000 N的压力;沿 $y$ 轴正方向、大小为10 mm的位移,以此驱动增阻块在井壁岩石上滑动。同时,约束其他方向自由度,以此保证增阻块在与井壁岩石接触滑动过程中不发生偏斜。增阻块与井壁岩石接触面上的摩擦系数为0.2。

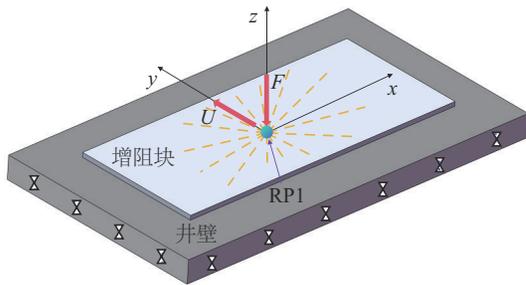


图6 接触仿真模型边界条件设置

Fig.6 Boundary condition setting of the contact simulation model

析,以正六边形的凸包为基础结构,进行增阻块的仿生形态设计。以凸包外圆直径 $d$ (1、2、4 mm)、间距(0.25、0.5、1 d)、倾角( $0^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ )和排布方式(正三角形、矩形、同心圆)为研究因素,并对每个研究因素设置3个水平,建立四因素三水平正交表(见表2)。

表2 增阻块仿生形态设计正交表

Table 2 Orthogonal table of bionic morphology design of incremental block

因素组号	直径/mm	排布方式	间距/mm	倾角/ $^\circ$
1	1	正三角形	0.25 d	0
2	1	矩形	0.5 d	5
3	1	同心圆	1 d	10
4	2	正三角形	0.5 d	10
5	2	矩形	1 d	0
6	2	同心圆	0.25 d	5
7	4	正三角形	1 d	5
8	4	矩形	0.25 d	10
9	4	同心圆	0.5 d	0

### 3.2 增阻仿生形态设计与优选

#### 3.2.1 仿生凸包参数对增阻效果的影响

##### 3.2.1.1 增阻块仿生形态设计

基于对蜥蜴头部的微观凸包结构的观察与分

析,采用三维设计软件在增阻件试样(长70 mm,宽30 mm)上建立相应的仿生凸包表面形态见图7。

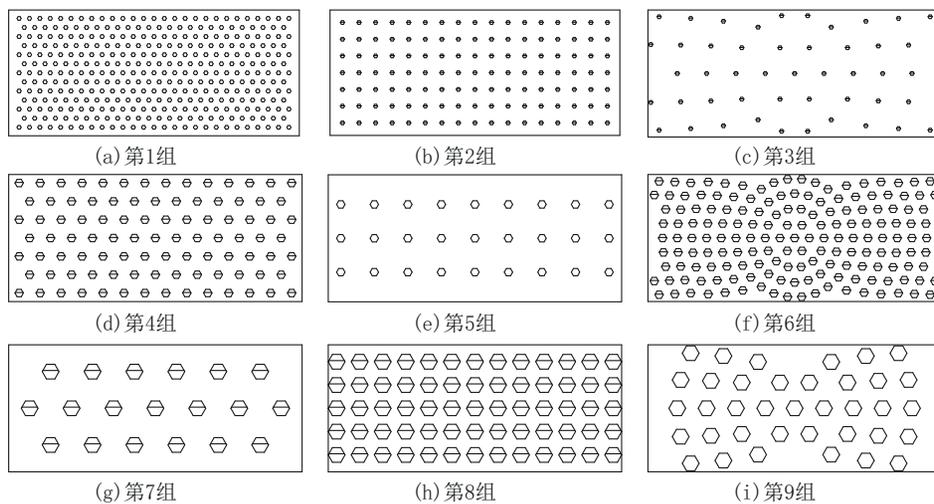


图7 仿生凸包表面形态设计

Fig.7 Bionic bump surface morphology design

##### 3.2.1.2 模拟结果分析与讨论

通过模拟9组不同凸包表面形态的增阻块与岩石之间的接触摩擦滑动过程,得到不同增阻块由静止状态到匀速滑动状态过程中其接触面受到的摩

擦阻力的大小,如表3所示。

对上述结果采用正交试验极差分析可得:对增阻块与井壁间摩擦反力大小影响最大的因素为直径,排布方式和间距的影响次之,倾角的影响最小。

表 3 增阻块与井壁接触摩擦反力的特征参数

Table 3 Characteristic parameters of the contact frictional reaction force between the block and the well wall

组别	摩擦反力/N
1	2061
2	2705
3	2151
4	2343
5	2535
6	1965
7	1753
8	1887
9	1864

影响因素的最佳水平组合为:凸包直径 1 mm、间距 0.5 mm、无倾角,采用矩形排布方式。由于倾角因素对增阻块与井壁之间的摩擦阻力的大小影响最小,因此,后续着重分析凸包直径、间距以及排布方式对其增阻效果的影响。

3.2.2 仿生凸包直径和间距对增阻效果的影响

3.2.2.1 增阻块仿生直径和间距设计

基于上一节正交设计的相关参数,设计如表 4 所示的 10 组模拟,其中第 10 组为对照组,在增阻块表面无仿生结构形态设计。同时,为凸包间距设置具体的参数,以便后续实验。

表 4 增阻块仿生直径和间距设计

Table 4 Bionic morphology design of incremental block

组别	直径/mm	相邻间距/mm	中心间距/mm	间距/直径
1	1	1	2	2.0
2	1	1.5	2.5	2.5
3	1	2	3	3.0
4	2	1	3	1.5
5	2	1.5	3.5	1.8
6	2	2	4	2.0
7	3	1	4	1.3
8	3	1.5	4.5	1.5
9	3	2	5	1.7
10	增阻块表面无仿生结构设计			

3.2.2.2 模拟结果分析与讨论

仿真完成后,提取增阻块由静止状态转变为运动状态时的最大静摩擦力,如图 8 所示,设置有仿生结构的增阻块相较于未设置仿生结构的增阻块,其

受到的摩擦反力更大,增阻效果明显。当增阻块表面设置的凸包直径为 3 mm、相邻间距为 1 mm 时,其增阻效果最好,相较于表面无仿生结构设计的增阻块,其摩擦反力提高了 14.57%;其中,第 4、7、8 组仿生表面结构设计,其凸包间距与凸包直径的比值在 1.50 左右,而这样的结果与第二章中基于螭螂头部凸包的观察结果相吻合。

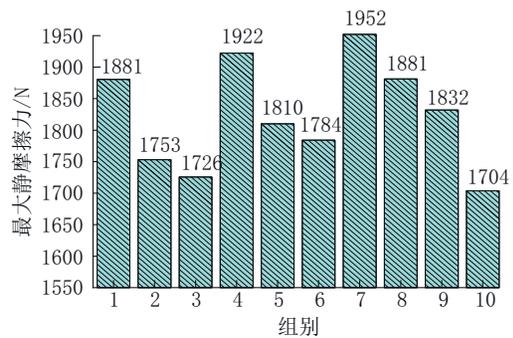


图 8 不同表面结构的最大静摩擦力

Fig.8 Maximum static friction for different surface structures

如图 9 所示,当增阻块表面设置的凸包结构的相邻间距保持不变时,随着凸包直径的增大,其受到的摩擦反力不断增大,增阻效果愈加明显。同时,也可以得出,在不同的仿生凸包相邻间距下,因凸包直径改变而引起的摩擦反力大小的变化均呈上升趋势。当增阻块表面设置的凸包结构的直径保持不变时,随着凸包相邻间距的增大,其受到的摩擦反力不断降低,增阻效果越来越弱。在不同的仿生凸包直径下,因凸包相邻间距改变而引起的摩擦反力大小的变化均呈降低趋势。

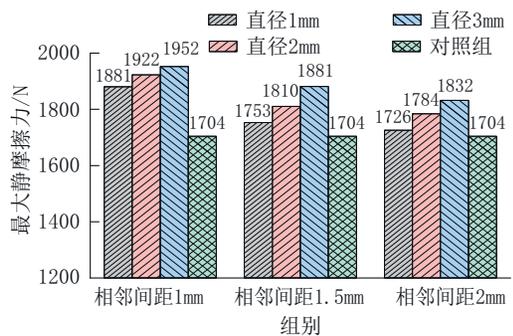


图 9 相同凸包间距不同直径的表面结构摩擦反力对比

Fig.9 Comparison of frictional reactions of surface structures with different diameters for the same bump spacing

为了深刻理解增阻块与井壁接触时对井壁岩石的损伤机理,以第8组为例,分析增阻块与井壁接触滑动中,岩石的最大主应力和最大主应变的分布特征,如图10、图11。

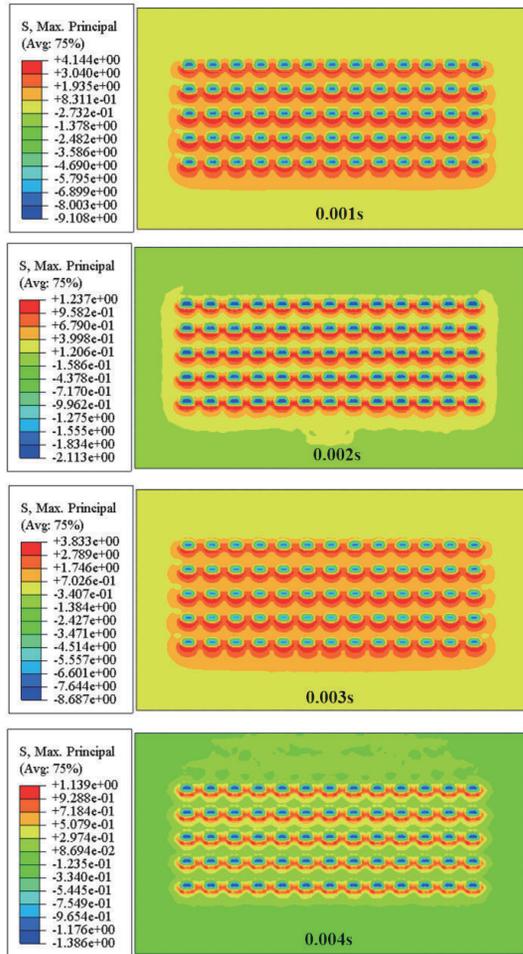


图10 不同时段岩石最大主应力分布

Fig.10 Distribution of maximum principal stresses in rocks at different time periods

可以看出,增阻块是沿着正压力与摩阻力合力的方向挤压岩石,形成钻具系统实现增阻加压的反力支撑点。当增阻块发生移动时,岩石表面的应力集中点开始远离增阻块的挤压,形变减小,应力集中程度降低,相应地,对岩石地损伤也就越小。同时,在增阻块与井壁岩石由静止接触状态转变为滑动接触状态时,岩石的形变是最大的,对其损伤也最大。一旦增阻块开始滑动接触,在增阻块与井壁岩石之间的接触形式始终保持一种挤压-分离-再挤压周期性循环模式,岩石的形变也在逐步趋于稳定。

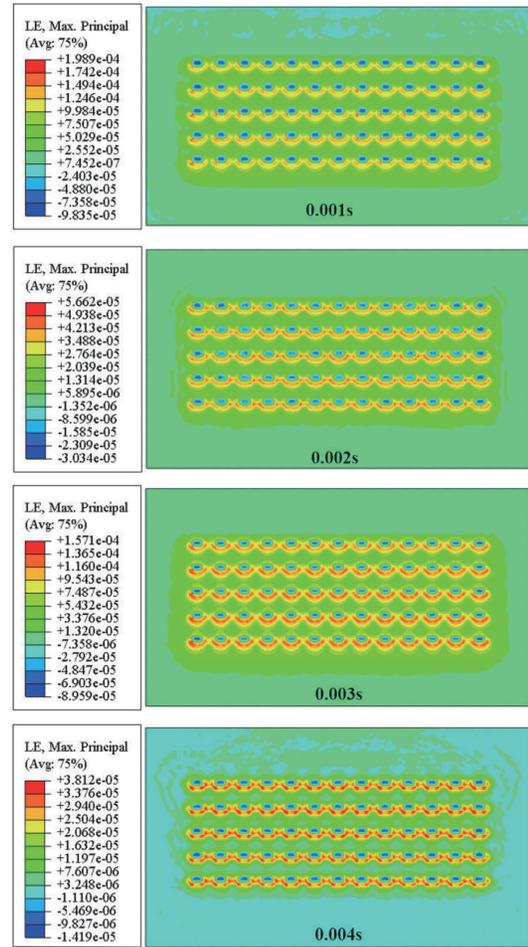


图11 不同时段岩石最大主应变分布

Fig.11 Distribution of maximum principal strains in rocks in different time periods

为量化增阻块对井壁的损伤,将岩石损伤与岩石受应力时间相关联,应力值越大,作用时间越久,对岩石完整性越不利。因此,提取增阻块由静止状态转变为运动状态过程中其与井壁接触面的最大应力值,并将其随时间的变化曲线积分,获得不同应力曲线与时间轴围成的面积,以此量化评价增阻块在与井壁接触时对井壁造成的损伤(见图12)。

当增阻块表面设置的仿生凸包的直径为1 mm、相邻间距为2 mm时,在与井壁接触增阻过程中,对井壁的损伤最大,相较于对照组,损伤程度加剧31.34%。当增阻块表面设置的仿生凸包的直径为3 mm、相邻间距为1 mm时,在与井壁接触增阻过程中,对井壁的损伤最小,相较于对照组,损伤程度减弱48.03%。其中,对井壁损伤较小的仿生表面结构设计中,第1、4、7组表面结构对井壁的损伤分

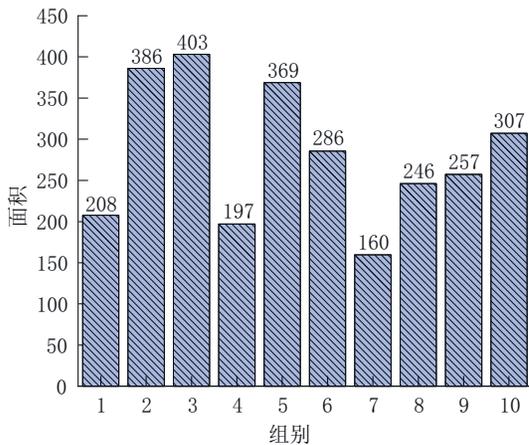


图 12 不同表面结构不同时刻最大应力曲线与时间围成的面积

Fig.12 Area enclosed by the maximum stress curves and time at different moments for different surface structures

别降低了 32.37%、35.83% 和 48.03%。

如图 13 所示,当增阻块表面设置的凸包的相邻间距保持不变时,随着凸包直径的增大,其对井壁的损伤程度在不断减弱。当保持凸包直径为 1 mm 以及 3 mm 不变时,随着凸包相邻间距的增加,增阻块对井壁的损伤程度不断加剧。而当保持凸包直径为 2 mm 时,随着凸包相邻间距的增加,增阻块对井壁的损伤程度先升高后降低。同时,也可以得到,当凸包直径为 1 mm 时,基于此参数设计的仿生表面结构均表现出对井壁低损伤的特点。

为了更加直观地得到不同仿生结构设计在接

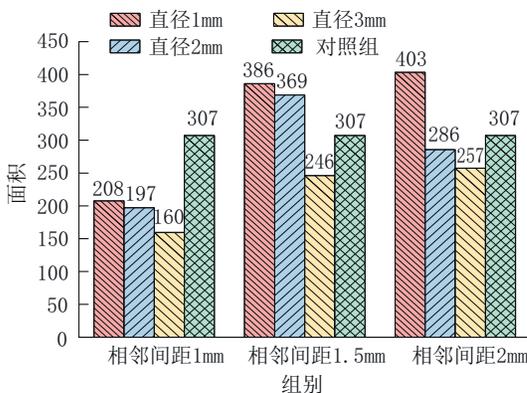


图 13 相同凸包间距不同直径的表面结构下最大应力曲线与时间围成的面积对比

Fig.13 Maximum stress curve and the area enclosed by time for surface structures with different diameters and same bump spacing

触增阻过程中所表现出的综合性能,将增阻块受到的摩擦反力和最大应力曲线围成面积的比值作为综合评价增阻块在与井壁接触增阻过程中性能好坏的指标。如图 14 所示,第 7 组(凸包直径为 3 mm,相邻间距为 1 mm)仿生结构设计具有最佳的增阻性能,相较于表面未设置仿生结构的增阻块,其增阻性能提高 120.47%。

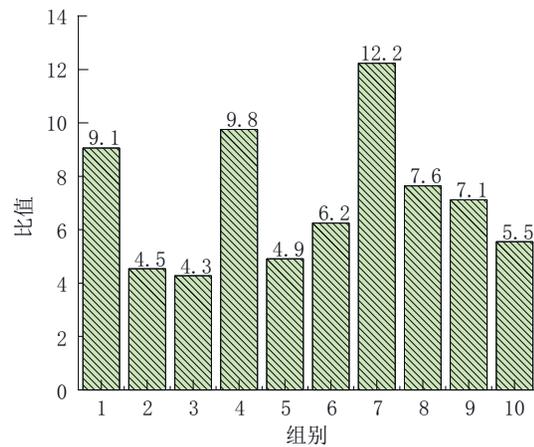


图 14 不同表面结构摩擦反力与其应力曲线围成面积的比值

Fig.14 Ratio of friction reaction force to the area enclosed by its stress curve for different surface structures

### 3.2.3 仿生凸包排布方式对增阻效果的影响

#### 3.2.3.1 增阻块仿生排布方式设计

独立选择凸包排布方式对增阻块增阻效果的影响,结合第二章中对蛭螂头部表面微结构的研究结果(头部凸包微结构的间距与凸包直径的比值在 1.5 左右),最终确定以凸包直径 2 mm、相邻间距 1 mm 为基础设计参数,并在此基础上进行仿生凸包排布方式对增阻块增阻性能影响的研究。

#### 3.2.3.2 模拟结果分析与讨论

与前文分析方法一致,提取接触增阻过程中增阻块由静止状态转变为滑动状态时受到的最大静摩擦力(摩擦反力),如图 15 所示,采用正三角形、同心圆、矩形排布方式时,增阻块受到的最大静摩擦力依次降低,但相较于表面未设置仿生表面结构的增阻块,其摩擦反力值依次提高 17.67%、13.43%、12.82%。其中,采用三角形方式排布的仿生表面结构表现出最佳的增阻效果。此外,矩形排布方式的仿生表面结构保持着对井壁的最低损伤,正三角形

排布方式次之,同心圆排布方式对井壁的损伤最大;对于增阻块的综合增阻性能而言,正三角形排布方式的仿生表面结构呈现出最佳的增阻性能,矩形排布方式次之,同心圆排布方式的增阻性能最弱。

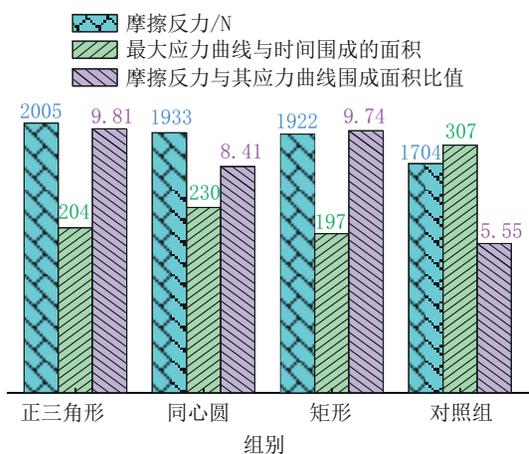


图15 不同分布结构下的摩擦效果对比

Fig.15 Comparison of friction effects with different distribution structures

## 4 自行走给进系统支撑机构的静摩擦和井壁损伤实验

### 4.1 实验装置与材料

#### 4.1.1 摩擦磨损实验台

自行走给进系统支撑机构的测试采用课题组自主研发的摩擦磨损实验台。

实验控制平台,可输入电机的扭矩、试块的速度以及试块移动的位移,并监控测试块拉压力、位移、速度、扭矩等数据。

#### 4.1.2 实验材料

岩石使用石灰岩,尺寸为边长400 mm的正方体,中心开有直径216 mm的通孔,其中心通孔已经调心完成。测试块材质为45号钢,圆弧半径为108 mm,长度为70 mm,宽度为30 mm,采用数控加工的方法加工出仿生增阻单元,如图16为加工完成的部分测试块。

### 4.2 最大静摩擦力测试结果与分析

测定试块与岩石的静摩擦力时,记录试块与岩石从相对静止到滑动过程中的拉压力传感器示数,所得数据减去试块自重并绘制曲线,曲线最高点即为最大静摩擦力大小。

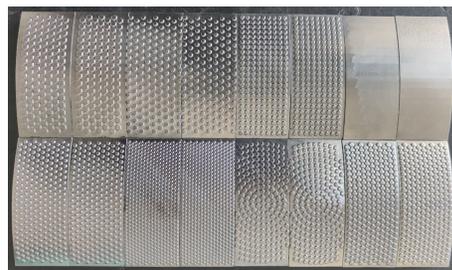


图16 仿生结构测试块

Fig.16 Tested block with bionic structure

#### 4.2.1 仿生凸包直径与间距对静摩擦阻力的影响

提取拉压传感器数据,可得到测试块在纵向的受力情况。表5所示为不同间距直径静的测试快仿生单元静摩擦力测试结果,其中第6组为无仿生单元的光滑测试块。

表5 不同间距直径仿生单元摩擦力测试数据

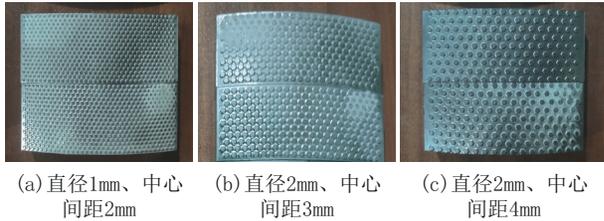
Table 5 Test data for friction of bionic units with different spacing diameters

实验组	凸包直径/mm	凸包中心间距/mm	间距/直径	最大静摩擦力/N	增阻百分比/%
1	1	2	2.0	464.8	97.7
2	1	3	3.0	257.7	9.6
3	2	3	1.5	378.3	60.9
4	2	4	2.0	270.4	15.0
5	3	4	1.3	491.9	109.2
6	无	无	无	235.1	0

通过数据可以看出,增阻效果较好的3个试块其凸包中心间距与直径比值大致在1.5,与模拟结果保持一致。通过对比第1组数据和第4组数据可知,间距与直径比例在2时,凸包直径越小,增阻效果越明显;对比第2与第3组、第4与第5组数据可知,中心间距相同时,增大凸包大小有助于提升静摩擦力;对比第1组与第2组、第3组与第4组数据可知,在控制仿生凸包直径大小相同的情况下,增大凸包之间的间距,会降低试块的增阻效果。

值得注意的是,在实验过程中存在不同程度的岩粉填充仿生凸包间隙的现象,如图17所示,且当凸包相邻间距保持一致时,凸包直径越小,岩粉填充的越密实。这种现象不容忽视,实际实验中,增阻块表面不同区域的仿生结构之间出现不同程度的岩粉填充,可能会起到增大仿生凸包直径的效果,亦或是改变增阻块与岩石的接触受力角度,从

而起到增阻效果。关于岩粉填充对仿生凸包与岩石之间阻力的影响值得进一步探究。



(a)直径1mm、中心间距2mm (b)直径2mm、中心间距3mm (c)直径2mm、中心间距4mm

图 17 试块岩粉填充情况

Fig.17 Rock dust filling condition of tested blocks

#### 4.2.2 仿生凸包排布方式对最大静摩擦阻力的影响

提取相同直径和间距(直径 2 mm, 中心间距 3 mm)、不同排布方式(正三角形、矩形、圆形排布)的 3 组实验数据与光滑测试块的数据进行对比分析, 制作实验数据表如表 6 所示, 其中第 4 组实验数据为无仿生结构的对照组数据。

表 6 不同排布方式仿生单元摩擦测试结果

Table 6 Friction test results of bionic units with different arrangements

实验组	排布方式	最大静摩擦力/N	增阻百分比/%
1	正三角形	378.3	60.9
2	矩形	376.5	60.2
3	同心圆形	333.7	41.9
4	无	235.1	0.0

根据测试结果不难看出, 正三角形排布和矩形排布增加的摩擦阻力大致相同, 均优于同心圆形排布方式。与模拟结果相对比, 通过实验所得不同仿生测试块静摩擦阻力增幅程度大大提高, 但总体趋势大体相同, 说明有限元分析具有一定可靠性。

#### 4.3 井壁微损伤测试结果与分析

测试块在增阻过程中会在井壁留下划痕, 同时测试快重复在同一位置增阻过程中, 自身受力情况也会有所不同, 因此通过观察井壁形貌和检测测试块受力情况能够预测支撑机构对井壁的损伤。将不同的测试块在岩石内壁以微小的速度单向滑动 3 次, 观察记录拉压传感器示数, 分析最大静摩擦变化情况, 以观察不同仿生结构测试快对井壁的损伤。

#### 4.3.1 仿生凸包直径与间距对井壁的微损伤分析

提取 5 种不同直径和间距的仿生结构测试块实验时拉压传感器数据, 每个测试块 3 组实验室据, 如表 7 所示。

表 7 不同直径间距仿生单元 3 次摩擦阻力测试数据

Table 7 Data from 3 frictional resistance tests of bionic units with different diameter spacing

实验组	凸包直径/mm	中心间距/mm	第 1 次增阻百分比/%	第 2 次增阻百分比/%	第 3 次增阻百分比/%
1	1	2	97.7	93.1	92.7
2	1	3	9.6	4.2	-8.8
3	2	3	60.9	60.2	55.9
4	2	4	15.0	-3.1	-13.1
5	3	4	109.2	107.3	106.2

从实验数据可知, 随着实验次数的增加, 各个测试块增阻百分比出现了不同程度的下降, 这是由于在相同位置进行多次实验时, 仿生凸包对井壁产生微损伤并不断碾压、破碎, 并根据自身的仿生单元的形状产生了微沟槽, 降低了使用过程中的最大静摩擦。

在实验中发现, 在进行多次摩擦测试过程中, 静摩擦阻力出现了负增长, 说明这两种测试块对井壁的损伤程度大, 破坏了岩石表面结构, 形成了贴合测试块凸包结构的沟槽, 同时破碎时产生的石灰岩粉颗粒在凸包与岩石表面起到一定润滑作用, 降低了最大静摩擦力, 见图 18。

通过对比数据可知, 相同凸包直径条件下, 间距越大, 对井壁的损伤越大; 保持凸包间距不变, 凸包直径越小, 对井壁的损伤越大。这种现象的原因



图 18 测试块与岩石接触痕迹

Fig.18 Marks produced by the contact of the tested blocks and the rock

在于,在前进过程中,前后两个凸包间的岩石受到前面凸包所提供的切向拉应力,受到后面凸包提供切向压应力,这两种应力存在应力干涉现象,间距过大时,两种应力干涉作用较弱,单个凸包破碎岩石作用显著,而随着间距减小,这种干涉现象愈发显著,凸包之间协同作用削弱单一凸包对岩石的破碎,进而降低单一凸包对岩石的损伤,宏观来看仿生单元整体对岩石的损伤相对减弱。而增大凸包直径或缩小凸包间距能有效加强这种应力干涉现象。

#### 4.3.2 仿生凸包排布方式对井壁的微损伤分析

根据前文所设置的正三角形、矩形、同心圆形三种仿生凸包排布方式,进行相应实验,得到柱状图(图19)。

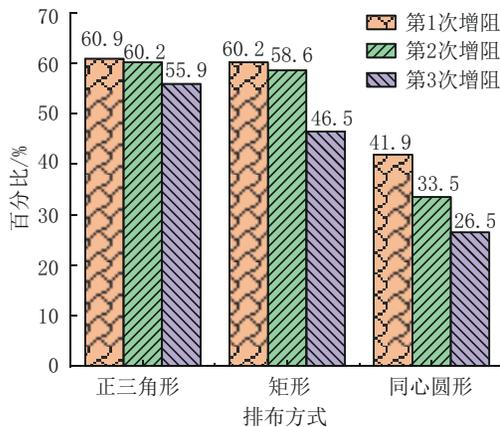


图19 不同排布方式3次增阻百分比柱状图

Fig.19 Incremental percentage for 3 passes in different rows

正三角形排布对井壁的微损伤最轻,3次实验中分别摩擦阻力分别下降了0.7%和4.3%,矩形排布则下降了1.6%和12.1%,同心圆形排布对井壁的损伤较大,两次下降幅度分别达到了8.4%和9.0%。

对于矩形排布,第2次实验增阻百分比下降幅度较小,但第3次实验增阻效果明显下降更多,这是由于矩形排布的仿生结构在前进时,凸包沿着前进方向进行投影时存在空隙,这部分空隙在实验过程中不与凸包接触,图20为仿生凸包采用不同排布形式测试的井壁微痕,当凸包破碎与之接触的岩石时也保留完好,形成了“微岩脊”,从而形成了微沟槽,降低了接触时的静摩擦力。而正三角形和同心圆形排布由于是错位排布,实验试块凸包相邻间距为

1 mm 小于凸包直径 2 mm,因此三角形排布沿着前进方向投影无空隙,而同心圆排布随着圆的直径增大,投影时会有部分空隙,因而增阻效果相对较差。综合来看,仿生单元采用矩形排布优于同心圆形排布,而正三角排布优于矩形排布方式。

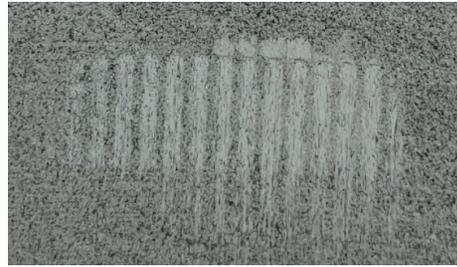


图20 仿生试块与井壁接触产生的微痕

Fig.20 Microtraces produced by contact of bionic tested blocks with the well wall

## 5 结论

(1)通过对蛭螂头部增阻非光滑测定与分析得出:蛭螂头部凸包间距与直径的比值在1.50左右;中间部位凸包的直径与对应蛭螂头部长度的比值在1:142~1:133,且在1:138附近出现的概率较大,两边凸包的直径与对应蛭螂头部长度的比值在1:173~1:158之间,且在1:167附近出现的概率较大;中间部位凸包所占比例在45%左右,两侧所占比例基本相同。

(2)通过仿真分析得出:仿生凸包中心间距与凸包直径的比值在1.5左右,均具有相对较高的增阻效果;结合井壁损伤,建立了增阻效果评定指标,仿生结构参数为直径3 mm、相邻间距1 mm、中心间距4 mm的测试块增阻效果良好。从仿生凸包排布方式的角度讲,采用正三角形、同心圆、矩形排布摩擦反力依次提高17.67%、13.43%、12.82%;考虑对井壁的损伤,正三角形排布方式的仿生表面结构呈现出最佳的综合增阻性能,矩形排布方式次之,同心圆排布方式的综合增阻性能最弱。

(3)通过实验测定,得出:仿生结构设计的间距与直径比值在1.5附近时,有良好的增阻效果,摩擦阻力分别提高了97.7%、60.9%和109.2%;间距与直径比值大于1.5的增阻块其增阻效果有明显下降,且对岩石损伤较大。从仿生凸包排布方式的角度讲,正三角形排布方式的仿生表面结构呈现出最佳的综合增阻性能,矩形排布方式次之,同心圆排

布方式的综合增阻性能相对较差。

### 参考文献(References):

- [1] 黎明和,何斌,秦海燕,等.具有黏附方向性及自适应性的仿生湿吸足垫研究[J].科学通报,2011,56(7):529-535.  
LI Minghe, HE Bin, QIN Haiyan, et al. Research on bionic wet-absorbent foot pads with adhesion directionality and self-adaptability[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(7): 529-535.
- [2] He B, Wang Z P, Li M H, et al. Wet adhesion inspired bionic climbing robot[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(1):312-320.
- [3] 隋秀华.传动滚筒仿生摩擦学设计与性能分析研究[D].青岛:山东科技大学,2008.  
SUI Xiuhua. Study on bionic tribological design and performance analysis of driving drum[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2008.
- [4] 高科,唐琼琼,孙阳,等.仿生高效切削齿试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(8):69-71.  
GAO Ke, TANG Qionqiong, SUN Yang, et al. Experimental study on efficient bionic cutting teeth[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(8):69-71.
- [5] 张毅,孙友宏,任露泉.钻头泥包的土壤动物仿生学分析研究[J].探矿工程,2003(2):41-43.  
ZHANG Yi, SUN Youhong, REN Luquan. Research on Soil animals for the bionic analysis to abort bit balling[J]. Exploration Engineering, 2003(2):41-43.
- [6] 王建强,李国民,汤小仁,等.凸包型仿生耦合金刚石钻头模拟分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(1):77-79,84.  
WANG Jianqiang, LI Guomin, TANG Xiaoren, et al. Simulation analysis on bionic coupling diamond bit with convex domes[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(1):77-79,84.
- [7] 郭旭升.以关键核心技术突破带动我国深层、超深层油气勘探开发突破[J].能源,2022(9):46-50.  
GUO Xusheng. Breakthroughs in deep and ultra-deep oil and gas exploration and development in China driven by key core technology breakthroughs[J]. Energy, 2022(9):46-50.
- [8] 李金波.深部储层弹塑性力学表征及水力裂缝扩展机理研究[D].大庆:东北石油大学,2023.  
LI Jinbo. Research on elastoplastic mechanical characterisation and hydraulic fracture propagation mechanism of deep reservoir[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2023.
- [9] 李阳,薛兆杰,程喆,等.中国深层油气勘探开发进展与发展方向[J].中国石油勘探,2020,25(1):45-57.  
LI Yang, XUE Zhaojie, CHENG Zhe, et al. Progress and development directions of deep oil and gas exploration and development in China[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1):45-57.
- [10] 张远东,方辉,刘帅奇,等.深地油气勘探开发技术发展现状与趋势[J].世界石油工业,2023,30(6):12-20.  
ZHANG Yundong, FANG Hui, LIU Shuaiqi, et al. Process and development direction of deep oil and gas exploration and development[J]. World Petroleum Industry, 2023, 30(6):12-20.
- [11] 周忠鸣.超深层岩石力学特性及岩—钻相互作用机理研究[D].北京:中国科学院大学,2022.  
ZHOU Zhongming. Study on rock mechanical characteristics and rock-drilling interaction mechanism under ultra-deep conditions[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2022.
- [12] 高科,张聪,赵研,等.救援钻孔用双钻头扭矩自平衡钻进系统理论与实验[J].煤田地质与勘探,2022,50(11):85-93.  
GAO Ke, ZHANG Cong, ZHAO Yan, et al. Theory and experiment of the dual-bit torque self-balancing drilling system for rescue drilling[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(11):85-93.
- [13] 张聪,高科,谢晓波.一种自行走自变向导向钻进系统:CN202022054651.2[P].2020-09-18.  
ZHANG Cong, GAO Ke, XIE Xiaobo. A self-propelled self-variable guided drilling system: CN202022054651.2[P]. 2020-09-18.
- [14] 任露泉.地面机械脱附减阻仿生创新之路[C]//中国农业机械学会2008年学术年会.济南:中国农业机械学会,2008:19-25.  
REN Luqian. The road to bionic innovation for ground machine desorption and drag reduction[C]//China Agricultural Machinery Society Annual Conference 2008. Jinan: Chinese Society of Agricultural Machinery, 2008:19-25.
- [15] 栾芸,侯晓婷,刘伟,等.工程仿生在农业机械减阻技术的应用与展望[J].中国农机化学报,2016,37(9):245-249,258.  
LUAN Yun, HOU Xiaoting, LIU Wei, et al. Applications and prospects of using engineering bionics in agricultural machinery drag reduction technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(9):245-249,258.
- [16] 程红,孙久荣,李建桥,等.臭蜚螂体壁表面结构及其与减粘脱附功能的关系[J].昆虫学报,2002,45(2):175-181.  
CHENG Hong, SUN Jiurong, LI Jianqiao, et al. Structure of the integumentary surface of the dung beetle copris ochus motschulsky and its relation to non-adherence of substrate particles[J]. Acta Entomologica Sinica, 2002, 45(2):175-181.
- [17] 孙霁宇.臭蜚螂表皮纳米力学测试方法和纳米力学行为[D].长春:吉林大学,2005.  
SUN Jiyu. Analyzing methods for nanoindentation and nanomechanical properties of the cuticle of dungbeetle copris ochus Motschulsky[D]. Changchun: Jilin University, 2005.
- [18] 孙霁宇,佟金,陈东辉.臭蜚螂部位表皮纳米力学性能的测试研究[C]//中国农业机械学会2008年学术年会.济南:中国农业机械学会,2008:374-378.  
SUN Jiyu, TONG Jin, CHEN Donghui. A test study on the nanomechanical properties of the epidermis of stink dung beetle site[C]//China Agricultural Machinery Society Annual Conference 2008. Jinan: Chinese Society of Agricultural Machinery, 2008:374-378.

(编辑 王文)